

(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

(11) N° de publication :  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

**2 645 941**

(21) N° d'enregistrement national :

**89 04989**

(51) Int Cl<sup>8</sup> : F 16 L 41/00; C 10 G 9/20.

(12)

## DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

(22) Date de dépôt : 14 avril 1989.

(30) Priorité :

(43) Date de la mise à disposition du public de la  
demande : BOPI « Brevets » n° 42 du 19 octobre 1990.

(60) Références à d'autres documents nationaux appa-  
rentés :

(71) Demandeur(s) : *PROCEDES PETROLIERS ET PETROCHI-  
MIQUES, Société à responsabilité limitée et LENGLET  
Eric. — FR.*

(72) Inventeur(s) : Eric Lenglet.

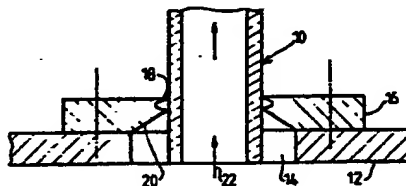
(73) Titulaire(s) :

(74) Mandataire(s) : Cabinet Ores.

(54) Dispositif de liaison entre un support métallique et un élément tubulaire en matériau réfractaire du type céramique, et installation de pyrolyse d'hydrocarbures comprenant de tels éléments et leurs dispositifs de liaison.

(57) L'invention concerne un dispositif de liaison entre un tube 10 en céramique et un support métallique 12, par exemple dans une installation de vapocraquage d'hydrocarbures. Une bague métallique 16 fixée sur le support 12 comprend un orifice central 18 entourant avec un jeu fonctionnel faible le tube 10 en céramique. Durant le fonctionnement normal de l'installation, ce jeu est obturé de façon étanche par un dépôt de coke.

L'invention permet notamment d'améliorer le rendement des installations de pyrolyse d'hydrocarbures.



FR 2 645 941 - A1

## 1

DISPOSITIF DE LIAISON ENTRE UN SUPPORT METALLIQUE ET UN  
ELEMENT TUBULAIRE EN MATERIAU REFRACTAIRE DU TYPE CERA-  
MIQUE, ET INSTALLATION DE PYROLYSE D'HYDROCARBURES COMPRE-  
NANT DE TELS ELEMENTS ET LEURS DISPOSITIFS DE LIAISON

5

L'invention concerne essentiellement un dispositif de liaison entre un support métallique et un élément tubulaire en matériau réfractaire du type céramique, ainsi que les installations de pyrolyse d'hydrocarbures, notamment de vapocraquage, qui sont équipées d'éléments tubulaires en céramique.

Dans la technologie traditionnelle des installations de vapocraquage d'hydrocarbures, les fours de vapocraquage comprennent des tubes de passage des hydrocarbures, qui sont réalisés en un alliage métallique Ni-Cr-Fe. Les températures d'utilisation de ces tubes sont limitées à des valeurs maximales inférieures à 1150° C, et il se forme sur les parois internes des tubes un dépôt de coke, d'autant plus que le nickel et le fer sont des catalyseurs de coke, ce qui nécessite un arrêt périodique fréquent de l'installation pour le décokage des tubes, par exemple par réaction chimique au moyen de vapeur d'eau.

Il serait bien entendu intéressant de remplacer ces tubes métalliques par des tubes en matière du type céramique, qui supportent des températures beaucoup plus élevées, par exemple de 1350-1500° C et plus pour le carbure de silicium et 1800-1900° C pour l'alumine et le nitrure de silicium. Les réactions de vapocraquage pourraient donc être réalisées à des températures supérieures à 900°, avec des temps de séjour des hydrocarbures dans la zone de réaction inférieurs à 50 millisecondes, ce qui permettrait d'augmenter de façon considérable les rendements en éthylène. A une température de 960° C et avec un temps de séjour de l'ordre de 20 millisecondes, les rendements obtenus seraient augmentés d'environ 25 à 30 % par rapport aux rendements actuels dans les installations classiques de vapo-

## 2

craquage à tubes métalliques. De plus, les céramiques ne contiennent pas de catalyseurs de coke, de sorte que la vitesse de dépôt de coke sur les parois internes des tubes est beaucoup plus faible que dans le cas des tubes métalliques.

L'utilisation de tubes en céramique dans les installations de vapocraquage n'a cependant jamais pu être réalisée pratiquement, en raison de deux inconvénients majeurs inhérents aux matériaux du type céramique :

- Ces matériaux ne sont pas ductiles et sont très sensibles aux cycles thermiques répétés, tels que ceux qui sont imposés par les arrêts périodiques de l'installation pour le décokage des tubes (toutes les huit semaines environ dans le cas des installations classiques de vapocraquage, et jusqu'à une fois par semaine dans le cas des installations ayant des fours de vapocraquage à très court temps de séjour des hydrocarbures). Ces cycles thermiques répétés sont susceptibles d'entraîner à long terme la rupture des tubes en céramique, notamment par fissurations sous-critiques.

- A leurs extrémités, les tubes en céramique doivent être reliés de façon étanche à des structures métalliques. En raison des différences importantes entre les coefficients de dilatation thermique des métaux et des céramiques, il n'a pas été possible jusqu'à présent de réaliser des dispositifs de liaison qui résistent d'une part à des températures très élevées de l'ordre de 1000° C et d'autre part, à des cycles thermiques répétés.

On a jusqu'à présent cherché à obtenir, par sertissage et précontrainte, une liaison entre la céramique et le métal qui soit étanche aussi bien à haute température qu'à basse température. Il en est résulté des contraintes différentielles très élevées à l'interface céramique-métal lors des variations de température, qui se traduisent par l'arrachement du métal et/ou par la rupture de la céramique. En général, les contraintes induites dans les tubes

3

en céramique à leurs extrémités se traduisent par l'apparition de défauts et microfissures dans la céramique, qui se développent au cours des cycles thermiques répétés et qui, par fissuration, conduisent à la rupture des tubes.

5 L'invention a pour but d'apporter une solution simple et efficace à ce problème.

Elle a donc pour objet un dispositif de liaison étanche céramique-métal, qui résiste à des températures élevées de 1000° C, et qui, en cas de cycles thermiques répétés, ne provoque pas la rupture de la céramique et/ou  
10 l'arrachement du métal.

L'invention a encore pour objet une installation de pyrolyse d'hydrocarbures, par exemple de vapocraquage d'hydrocarbures, comprenant des tubes en céramique et susceptible de fonctionner à des températures très élevées,  
15 avec des temps de séjour des hydrocarbures très brefs.

L'invention a encore pour objet une installation de ce type, permettant, sinon de supprimer les arrêts périodiques de fonctionnement pour décokage, du moins  
20 d'allonger considérablement la durée des périodes de fonctionnement entre des décokages successifs.

L'invention propose, à cet effet, un dispositif de liaison entre un support métallique et un tube en matériau réfractaire du type céramique, dans lequel passent des  
25 hydrocarbures soumis à une réaction de pyrolyse, caractérisé par un jeu fonctionnel à chaud et/ou à froid entre une extrémité du tube et le support métallique, ce jeu fonctionnel permettant éventuellement un léger débit de fuite d'hydrocarbures au démarrage de l'installation, et par un  
30 joint de coke déposé sur les surfaces du tube et du support qui définissent le jeu précité, ce joint de coke obturant de façon étanche le jeu précité, au moins pendant le fonctionnement normal de l'installation.

Le dispositif de liaison selon l'invention  
35 évite donc des contraintes élevées de sertissage ou de bridage à l'interface céramique-métal, au prix d'un léger dé-

4

bit de fuite d'hydrocarbures à cette interface pendant un temps relativement bref au démarrage de l'installation. Le dépôt de coke qui se forme à l'interface céramique-métal du fait de ce débit de fuite, obture très rapidement le jeu fonctionnel entre le tube de céramique et son support métallique, et réalise ainsi une liaison étanche entre le tube et le support. Si ce joint vient à être détruit ou détérioré, par exemple à la suite de cycles thermiques répétés, il se reforme de lui-même au cours du fonctionnement de l'installation, et se renforce automatiquement.

Selon une autre caractéristique de l'invention, ce joint de coke a une hauteur, ou dimension le long de l'axe du tube, qui est relativement faible de façon à constituer un élément de fragilité, susceptible de rupture lors de l'apparition de contraintes différentielles élevées entre le tube et le support métallique.

Le joint de coke joue donc le rôle d'un élément de sécurité, dont la rupture évite la détérioration du tube en céramique ou du support métallique et est par ailleurs sans conséquence, puisque le joint de coke se reforme automatiquement au cours du fonctionnement normal de l'installation.

Selon encore une autre caractéristique de l'invention, on prévoit que le support métallique, au moins dans sa partie définissant le jeu fonctionnel précité, est en métal contenant au moins en surface un catalyseur de coke, par exemple en métal à teneur élevée en nickel.

La présence de cette matière facilite et accélère bien entendu la formation du joint d'étanchéité en coke, entre le tube céramique et son support métallique.

L'invention propose également une installation de pyrolyse d'hydrocarbures, en particulier une installation de vapocraquage, comprenant des tubes en matière réfractaire du type céramique dans lesquels passent les hydrocarbures, caractérisée en ce que ces tubes sont reliés au moins à l'une de leurs extrémités, à un support métal-

## 5

lique par des dispositifs de liaison du type précité.

Une telle installation fonctionne à des températures plus élevées que dans la technique antérieure, avec des temps de séjour des hydrocarbures plus courts, ce qui  
5 permet une augmentation importante des rendements.

Selon encore une autre caractéristique de l'invention, cette installation comprend des moyens de décokage, en particulier des surfaces internes des tubes précités, au moyen de particules solides érosives injectées  
10 dans la charge d'hydrocarbures à traiter, ces particules ayant une taille moyenne, qui peut être comprise entre 4 et 450 microns environ, et qui est par exemple de 4 à 30 microns environ dans le cas de particules métalliques.

De cette façon, les moyens de décokage, qui  
15 sont constitués par les particules solides érosives véhiculées par la charge d'hydrocarbures, agissent uniquement sur le coke déposé sur les parois internes des tubes, et non sur les joints de coke formés entre ces tubes et les supports métalliques. D'une part, il n'est plus nécessaire  
20 d'arrêter le fonctionnement normal de l'installation pour procéder au décokage des tubes, d'autre part les joints de coke assurant la liaison étanche entre les tubes et les supports métalliques sont préservés, contrairement à ce qui se passerait si le décokage était réalisé par voie chimique.  
25 au moyen de vapeur d'eau ou d'air. Il en résulte un gain de productivité très important. En outre, la durée de vie des tubes en céramique est très augmentée, puisqu'ils ne sont plus soumis qu'à un nombre très réduit de cycles thermiques répétés.

30 Les avantages obtenus sont donc considérables.

L'invention sera mieux comprise et d'autres caractéristiques, détails et avantages de celle-ci apparaîtront plus clairement à la lecture de la description qui suit, faite en référence aux dessins annexés dans lesquels:  
35 la figure 1 représente schématiquement, en coupe axiale, un dispositif de liaison étanche entre un

6

support métallique et un tube en céramique, par exemple dans une installation de vapocraquage d'hydrocarbures ;

les figures 2 à 4 représentent schématiquement en coupe axiale des variantes de réalisation de ce dispositif de liaison.

la figure 5 est une vue, à plus grande échelle, d'une autre variante de réalisation de l'invention.

En figure 1, la référence 10 désigne un tube ou élément tubulaire en matière réfractaire à faible coefficient de dilatation thermique, telle qu'une céramique, un carbure, un nitrure, un oxyde, capable de supporter des températures très élevées pouvant atteindre 1800 ou 1900° C par exemple.

Dans l'exemple représenté, le tube 10 fait partie d'un four de vapocraquage d'hydrocarbures et a un diamètre interne de l'ordre de 10 à 30 mm, et une longueur comprise entre 1,4 et 6 mètres, par exemple. L'épaisseur de paroi d'un tel tube est de l'ordre de 3 mm. Eventuellement, des ailettes internes peuvent être formées en saillie sur sa surface intérieure, pour augmenter le transfert de chaleur entre l'atmosphère environnante (l'intérieur du four) et les hydrocarbures qui circulent à vitesse élevée dans le tube.

La référence 12 désigne un support métallique auquel l'extrémité du tube 10 doit être raccordée de façon étanche. La plaque métallique 12 comprend un orifice 14 traversé par l'extrémité du tube 10. La plaque métallique 12 peut faire partie par exemple d'un collecteur d'alimentation d'une pluralité de tubes 10.

Le dispositif de liaison entre le tube 10 et la plaque 12 comprend une bague ou rondelle métallique 16 fixée par tous moyens appropriés sur la plaque métallique 12 et comprenant un orifice central 18 traversé avec un jeu très faible par le tube 10. La hauteur, ou dimension du bord de l'orifice 18 parallèlement à l'axe du tube 10 est relativement faible, et cet orifice débouche dans un cham-

brage tronconique 20 de la bague 16.

La dimension radiale du jeu formé entre le tube 10 et l'orifice 18 de la bague 16 est par exemple comprise entre 0 et 0,2 mm à froid (c'est-à-dire à température ambiante) pour être de 0,1 à 0,3 mm à une température de fonctionnement de l'ordre de 1000° C, dans le cas où le diamètre du tube 10 est de 20 mm.

Les hydrocarbures à craquer circulent dans le tube 10 dans le sens indiqué par les flèches 22. Au début du fonctionnement de l'installation, il se produit donc un faible débit de fuite par le jeu fonctionnel entre le tube 10 et l'orifice 18 de la bague 16. Ce jeu fonctionnel est très rapidement obturé par un dépôt de coke, de sorte que la liaison entre le tube 10 et le support métallique 12,16 devient étanche.

La hauteur du joint de coke ainsi formé dans ce jeu fonctionnel est inférieure à 10 mm et est de préférence comprise entre 1 et 4 ou 5 mm environ. La hauteur du bord de l'orifice 18, parallèlement à l'axe du tube 10, est au plus égale à deux fois l'épaisseur de paroi du tube 10. Ainsi, le joint de coke constitue un élément de sécurité du type fragile, dont la rupture en cas de contrainte différentielle entre le tube 10 et son support métallique, évite toute détérioration du tube 10 et de son support. Par ailleurs, comme le bord de la bague 16 qui entoure étroitement le tube 10 est peu épais, il est susceptible de se déformer, ce qui évite une compression trop importante sur le tube 10, par exemple au refroidissement de l'installation.

Cet effet est encore accentué dans la variante de réalisation représentée en figure 2, où la bague 16 comprend une partie centrale tronconique 24 traversée avec un jeu très faible par le tube 10. Plus précisément, les deux faces de la partie 24 sont tronconiques et raccordées à l'orifice central 18 de la bague 16. En cas de contrainte différentielle importante entre le tube 10 et la bague 16, la partie tronconique 24 se déformera plus facilement que



la partie correspondante de la bague 16 représentée en figure 1.

Il est encore possible d'augmenter cette capacité de déformation en formant des fentes, de façon appropriée, dans la bague 16.

Dans la variante de réalisation de la figure 3, le tube 10 en céramique comprend à son extrémité un rebord radial 26 orienté vers l'extérieur et formant une bride de liaison au support métallique 12. Le rebord 26 est maintenu appliqué sur le support métallique 12 par une bague métallique 28 fixée au support 12 au moyen de boulons 30 et de moyens élastiques du type rondelles Belleville 32. L'orifice 14 de la plaque 12, qui communique avec l'intérieur du tube 10, à un diamètre supérieur au diamètre interne du tube 10, de sorte qu'il se forme au démarrage de l'installation un joint de coke sur la jonction 34 entre les faces en regard du rebord radial 26 du tube 10 et du support métallique 12.

Le joint de coke va alors travailler en cisaillement, dans une direction perpendiculaire à l'axe du tube 10, lors des cycles thermiques auxquels l'installation est susceptible d'être soumise.

Ces cycles thermiques peuvent être très largement espacés les uns des autres grâce à l'invention, qui prévoit de réaliser le décokage des surfaces internes des tubes 10 au moyen de particules solides érosives qui sont injectées dans la charge d'hydrocarbures à traiter, qui va circuler dans les tubes 10.

Les dimensions de ces particules solides sont choisies de telle sorte qu'elles ne risquent pas de provoquer une usure prématurée des tubes 10 d'une part, et des pièces métalliques associées aux tubes 10 d'autre part. On notera que dans tous les modes de réalisation représentés, la présence de ces particules solides érosives dans le courant d'hydrocarbures circulant dans les tubes 10 n'a aucun effet sur les joints de coke formés dans l'orifice 18 de la

9

bague 16 ou à la jonction 34 avec le rebord radial 26 du tube 10, puisque le débit d'hydrocarbures dans ces zones est nul, en raison de l'étanchéité du joint de coke. Le décokage peut donc être réalisé sans arrêter le fonctionnement normal de l'installation, et sans nuire à l'étanchéité de la liaison entre les tubes 10 et les supports métalliques 12.

Le nombre de cycles thermiques auxquels les tubes 10 sont susceptibles d'être soumis, est donc extrêmement réduit. Il en résulte une très grande durée de vie de ces tubes.

Dans les figures 1 à 3, on n'a représenté qu'une extrémité d'un tube 10. L'autre extrémité de ce tube peut elle aussi être fixée à un support métallique, par exemple au moyen du dispositif de liaison de la figure 3. On peut également utiliser un dispositif de liaison tel que ceux des figures 1 et 2.

Dans la variante de réalisation de la figure 4, l'extrémité du tube 10 comprend un dispositif de liaison avec le support métallique 12, qui est un collecteur d'alimentation d'une série de tubes 10, le dispositif étant du même type que celui représenté en figure 1, c'est-à-dire qu'une bague métallique 16 fixée sur le support 12, comprend un orifice central traversé avec un jeu fonctionnel très faible par le tube 12. De plus, cette bague métallique 16 est recouverte à distance par un canal 36, qui peut être commun à tous les tubes 10, et dont une paroi comporte un orifice 38 de passage de chaque tube 10. Une bague métallique 40, semblable à la bague 16, est montée sur cette paroi du canal 36 pour créer un jeu fonctionnel faible entre le bord de son orifice central et la paroi extérieure du tube 10.

Le canal 36 est alimenté, au moins au démarrage de l'installation, par des précurseurs de coke, par exemple un mélange vapeur d'eau-composés aromatiques lourds de pyrolyse qui va donc former très rapidement des dépôts de

coke importants sur les bords des orifices des axes 16 et 40 et obturer les jeux fonctionnels précités.

En effet, dans une installation de vapocraquage d'hydrocarbures, les hydrocarbures vaporisés qui pénètrent  
5 dans les tubes 10 sont à une température de 550° C par exemple, pour laquelle les vitesses de cokage sont relativement lentes. Dans certains cas, la formation d'un joint de coke sur ces extrémités des tubes 10 pourrait être relativement longue. Le dispositif de la figure 4 permet  
10 d'éviter cet inconvénient et de former un double joint de coke autour de l'extrémité "froide" des tubes 10.

Pendant les périodes de décokage, ou en permanence, le canal 36 peut être maintenu en légère surpression, pour éviter que des particules solides érosives viennent attaquer les joints de coke.  
15

Par ailleurs, et comme on l'a représenté schématiquement en figure 1, les surfaces des orifices des bagues ou pièces métalliques 16, 40 qui délimitent avec les tubes les jeux fonctionnels où vont se former les joints de  
20 coke, peuvent comprendre une rainure ou gorge qui se remplit de coke. Ainsi, lorsque le joint de coke a été détruit par cisaillement par exemple, il peut être reconstitué plus rapidement.

On a représenté en figure 5, à plus grande  
25 échelle, une autre variante du dispositif selon l'invention, applicable au cas où le tube 10 de matière céramique est à section non circulaire, par exemple rectangulaire, carrée, polygonale, etc...

Dans ce cas, l'étanchéité est formée autour du  
30 tube 10 au moyen de plaques métalliques 42, 44 qui délimitent entre elles et avec le tube 10 des jeux fonctionnels faibles susceptibles d'être obturés rapidement par un dépôt de coke. Pour permettre d'absorber les contraintes différentielles entre le tube 10 et son support métallique, les  
35 plaques 42, 44 sont à recouvrement ou chevauchement partiel les unes par rapport aux autres, comme représenté schématis-

quement en figure 5, ou à la façon d'écailles de poisson.

Des moyens élastiques exercent sur les plaques 42, 44 des forces de poussée orientées dans le sens des flèches représentées, c'est-à-dire tendant à appliquer ces  
5 plaques sur la paroi extérieure du tube 10.

Cette variante de réalisation du dispositif selon l'invention peut bien entendu être combinée avec celle de la figure 4.

L'invention s'applique de façon générale aux  
10 installations de pyrolyse des hydrocarbures, par exemple aux installations de vapocraquage d'hydrocarbures, ou aux installations de craquage d'hydrocarbures (notamment de méthane) pour la production d'acétylène.

Elle est applicable en général dans le cas des  
15 réactions de pyrolyse s'accompagnant d'une réaction secondaire de formation et de dépôt de carbone.

## REVENDEICATIONS

1) Dispositif de liaison entre un support métallique et un tube en matériau réfractaire du type céramique, dans lequel passent des hydrocarbures soumis à une réaction de pyrolyse, caractérisé par un jeu fonctionnel à chaud et/ou à froid entre une extrémité du tube (10) et le support métallique (12), ce jeu fonctionnel permettant éventuellement un léger débit de fuite d'hydrocarbures au démarrage de l'installation, et par un joint de coke déposé sur les surfaces du tube (10) et du support (12) qui définissent le jeu fonctionnel précité, ce joint de coke obturant de façon étanche le jeu précité, au moins pendant le fonctionnement normal de l'installation.

2) Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que le joint de coke a une hauteur, ou dimension le long de l'axe du tube (10), relativement faible de façon à constituer un élément de fragilité, susceptible de rupture lors de l'apparition de contraintes différentielles élevées entre le tube (10) et le support métallique (12).

3) Dispositif selon la revendication 2, caractérisé en ce que la hauteur du joint de coke est inférieure à 10 mm et est par exemple comprise entre 1 et 4 mm.

4) Dispositif selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le jeu précité est formé entre la surface extérieure du tube (10) et un bord mince d'un orifice (18) formé dans une plaque ou bague métallique (16) et traversé par le tube (10).

5) Dispositif selon la revendication 4, caractérisé en ce que l'épaisseur du bord de l'orifice (18) de la bague métallique (16) est au plus égale à deux fois l'épaisseur de paroi du tube (10).

6) Dispositif selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que le tube (10) comprend à son extrémité un rebord radial (26), maintenu appliqué sur le

13

support métallique (12) par une bague métallique (28), le joint de coke précité étant formé à la jonction (34) entre les faces en regard du rebord (26) du tube et du support métallique (12).

5                   7) Dispositif selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le support métallique, au moins dans sa partie définissant le jeu fonctionnel précité, est en métal contenant au moins en surface un catalyseur de coke, par exemple un métal à teneur élevée en nickel.

10                   8) Dispositif selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la partie (16,28) du support métallique qui coopère avec le tube (10) pour délimiter le jeu précité, est de nature relativement flexible.

15                   9) Dispositif selon l'une des revendications 1 à 8, caractérisé en ce que des moyens (36) d'amenée d'un mélange vapeur d'eau-composés aromatiques lourds de pyrolyse débouchent sur le jeu fonctionnel précité, à l'extérieur du tube (10).

20                   10) Dispositif selon la revendication 9, caractérisé en ce que ces moyens comprennent un canal (36) formé autour du jeu fonctionnel précité, et disposé à étanchéité autour du tube (10) avec un jeu fonctionnel propre à assurer la formation d'un autre joint de coke avec le tube.

25                   11) Dispositif selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que, le tube (10) étant à section non circulaire, le jeu fonctionnel précité est formé entre le tube (10) et des plaques métalliques (42,44) entourant le tube et disposées à recouvrement ou chevauchement partiel les unes par rapport aux autres.

30                   12) Installation de pyrolyse d'hydrocarbures, comprenant des tubes (10) en matière réfractaire du type céramique dans lequel passent les hydrocarbures, caractérisée en ce que les tubes (10) sont reliés, au moins à l'une de leurs extrémités, à un support métallique (12) par des dispositifs de liaison selon l'une des revendications pré-

cédentes.

- 13) Installation selon la revendication 12, caractérisée en ce qu'elle comprend des moyens de décokage, en particulier des surfaces internes des tubes (10) précités, au moyen de particules solides érosives injectées dans la charge d'hydrocarbures à traiter, ces particules ayant une taille moyenne comprise entre 4 et 450 microns environ, par exemple entre 4 et 30 microns environ dans le cas de particules métalliques.

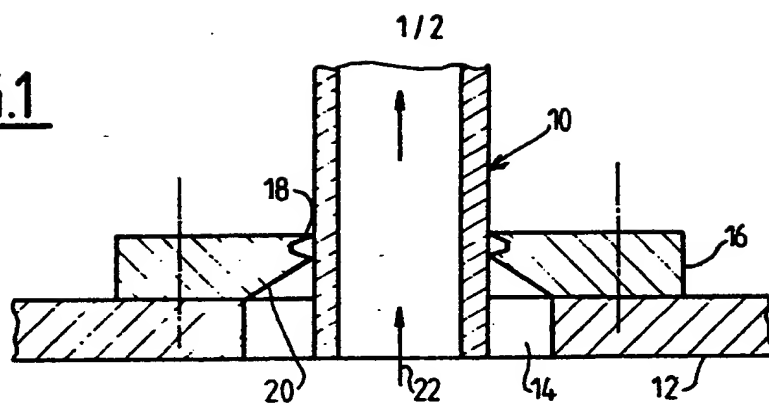
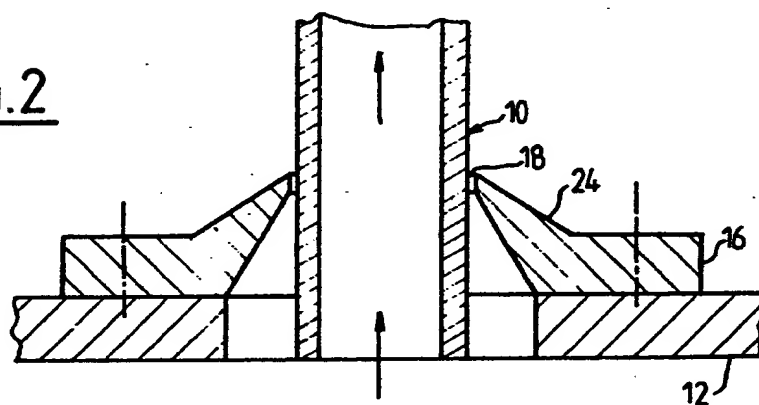
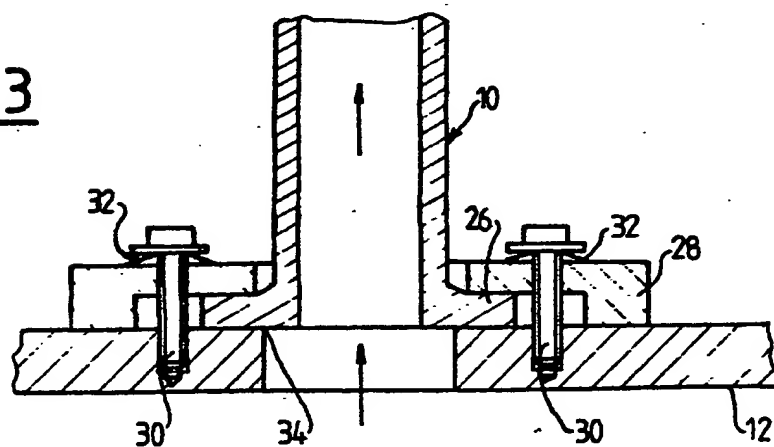
FIG.1FIG.2FIG.3



FIG.5

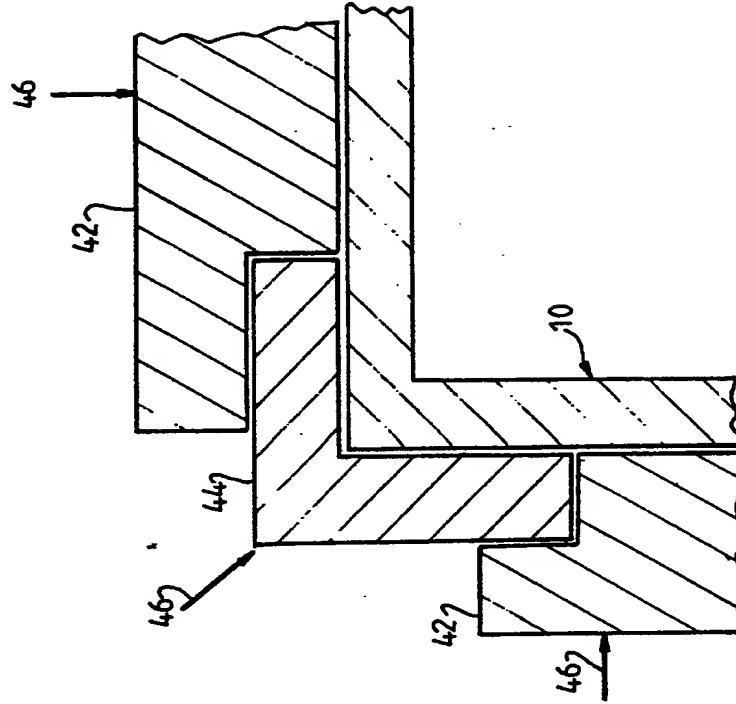


FIG.4

